

# Спектр позитронов, рождающихся при взаимодействии фоновых гамма-квантов с мягкими фотонами фонового излучения



А. Н. Попов<sup>1,\*</sup>, Д. П. Барсуков<sup>1</sup>, А. В. Иванчик<sup>1</sup>, С. В. Бобашев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

\*alexander.popov@mail.ioffe.com

## Введение

Пространство между галактиками и скоплениями галактик заполнено фоновым электромагнитным излучением различного происхождения [1]. Во-первых, это реликтовое излучение возникшее на  $z \sim 1000$  в эпоху рекомбинации, во вторых это внегалактическое оптическое и инфракрасное фоновое излучение (EBL), несущее информацию о звездах и темпе их формирования [1, 2, 3]. Рентгеновское фоновое излучение (СХВ) несет в себе информацию об процессах аккреции вещества на галактические ядра и, соответственно, о темпе формирования сверхмассивных черных дыр в центрах галактик [1, 3]. Возможно, также имеется фоновое ультрафиолетовое излучение (CUB), которое порождается молодыми горячими звездами и излучением межзвездных туманностей [1]. Фоновое гамма-излучение (СГВ) в основном состоит из излучения активных галактических ядер и, возможно, из фотонов, рожденных во время вспышек сверхновых [1, 4]. Данное излучение взаимодействует с межгалактическим газом, что приводит к появлению искажений в его спектре [5]. Помимо этого фотоны могут сталкиваться и взаимодействовать друг с другом [6]. В частности, возможен процесс Брейта-Уилера рождения электрон-позитронной пары при взаимодействии двух фоновых фотонов [7]. Это приводит к появлению в межгалактическом и, возможно, в междукластерном пространстве непрерывно действующего источника позитронов, более-менее равномерно распределенного по всей Вселенной.

## Модель

Рассмотрим взаимодействие СГВ фотона с EBL фотоном с рождением электрон-позитронной пары. Сечение этого процесса  $\sigma$  имеет вид [7]:

$$\sigma = \sigma(s) = \frac{\pi}{2} r_e^2 (1-v^2) \cdot \left( (3-v^4) \ln \left( \frac{1+v}{1-v} \right) - 2v(2-v^4) \right) h(s-1) \quad (1)$$

где  $r_e = \frac{e^2}{mc^2}$  – классический радиус электрона,  $m$  – масса покоя электрона,  $h(x)$  – функция Хевисайда ( $h(x) = 1$  при  $x > 0$  и  $h(x) = 0$  при  $x < 0$ ),

$$v = \sqrt{1-1/s} \quad \text{и} \quad s = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_l \varepsilon_\gamma}{m^2 c^4} (1 - \cos \Psi), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_l$  – энергия EBL фотона и  $\varepsilon_\gamma$  – энергия СГВ фотона,  $\Psi$  – угол между их импульсами. В качестве спектра EBL фотонов брался их наблюдаемый на  $z = 0$  спектр из работы [3], где  $z$  – красное смещение. Были рассмотрены два предельных случая: случай, когда локальная плотность EBL фотонов на красном смещении  $z$  просто возрастает в  $(1+z)^3$  раз по сравнению со своим значением

на  $z = 0$  и случай, когда локальная плотность EBL фотонов пропорциональна среднему темпу звездообразования  $S(z)$  на данном  $z$ . Спектр излучаемый источниками СГВ фотонов  $\frac{dN_\gamma}{d\varepsilon_\gamma dt}$  считается рав-

$$\frac{dN_\gamma}{d\varepsilon_\gamma dt}(\varepsilon_\gamma) = N_0 \cdot S(z) \cdot \left( \frac{\varepsilon_\gamma}{\varepsilon_0} \right)^{-\gamma} \cdot h(\varepsilon_{max} - \varepsilon_\gamma) \quad (3)$$

где показатель степени  $\gamma$  и нормировочные константы  $N_0$  и  $\varepsilon_0$  считались не зависящими от  $z$  [4], энергия  $\varepsilon_{max}$  также считалась не зависящей от  $z$ . Зависимость среднего темпа звездообразования  $S(z)$  от красного смещения либо считалась степенной  $S(z) = (1+z)^\beta$  [4, 8], либо использовалась её аппроксимация [8]:

$$S(z) = \frac{C}{10^{A(z-z_0)} + 10^{B(z-z_0)}} \quad (4)$$

где  $z_0 = 1.243$ ,  $A = -0.997$ ,  $B = 0.248$  и постоянная  $C$  считалась равной  $C = 0.180 M_\odot \text{ лет}^{-1}$  в 1 Мпк в сопутствующей системе отсчета [8].

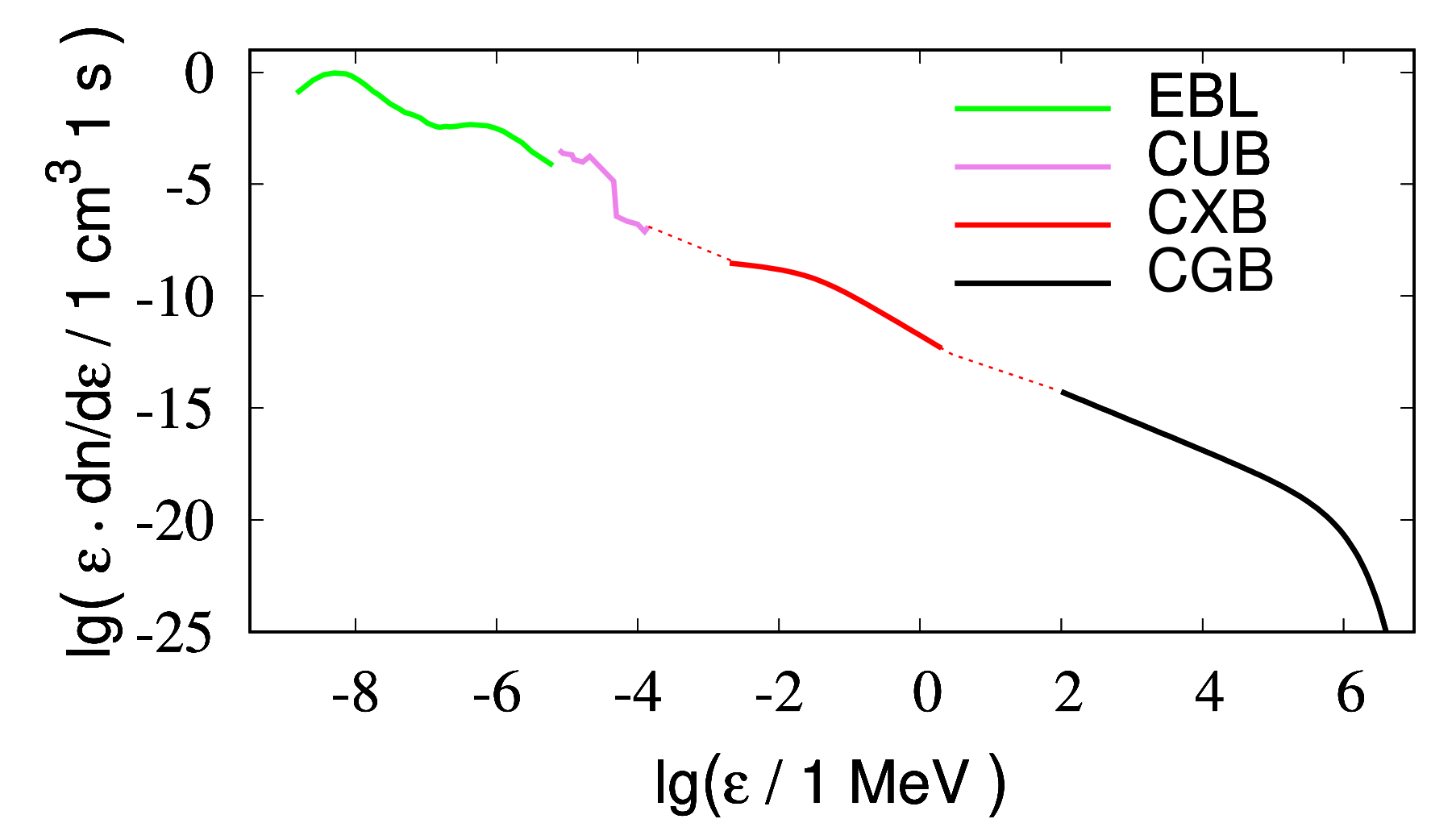


Рис. 1. Используемый спектр фоновых фотонов на  $z = 0$ . Штрихованные кривые соответствуют случаю продленного СХВ-спектра.

## Результаты

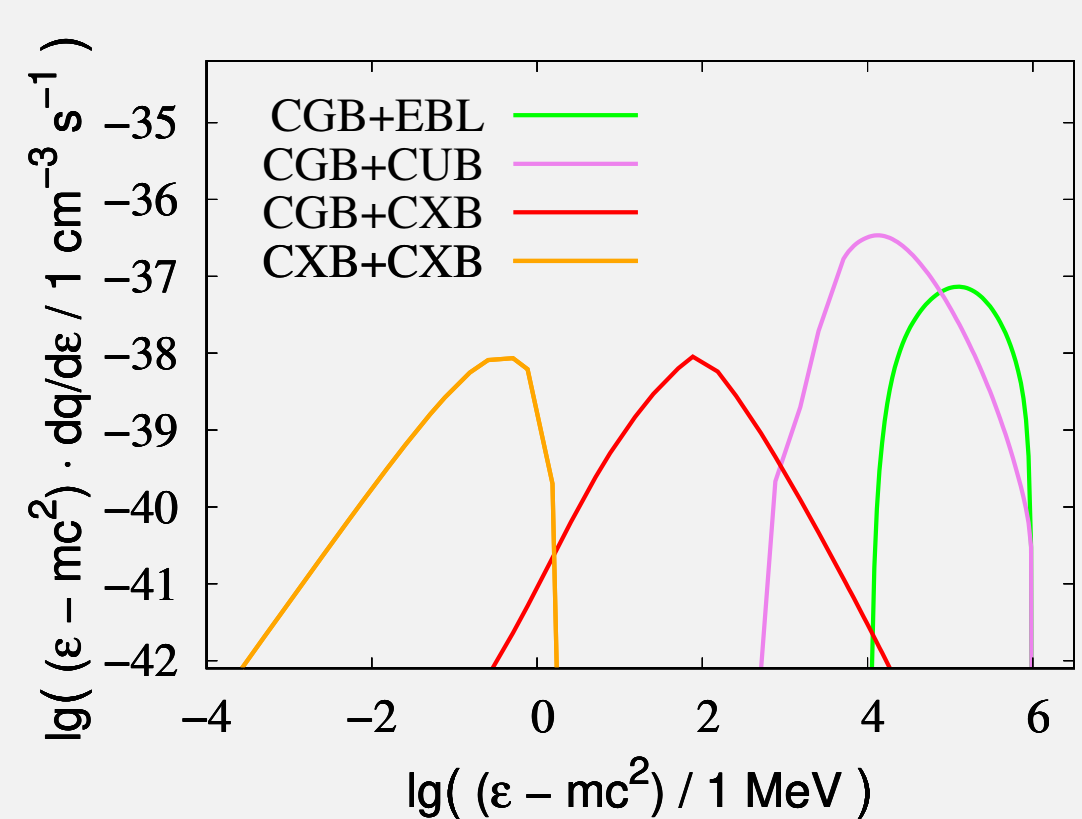


Рис. 2. Расчитанный спектр позитронов для  $z = 0.5$ .

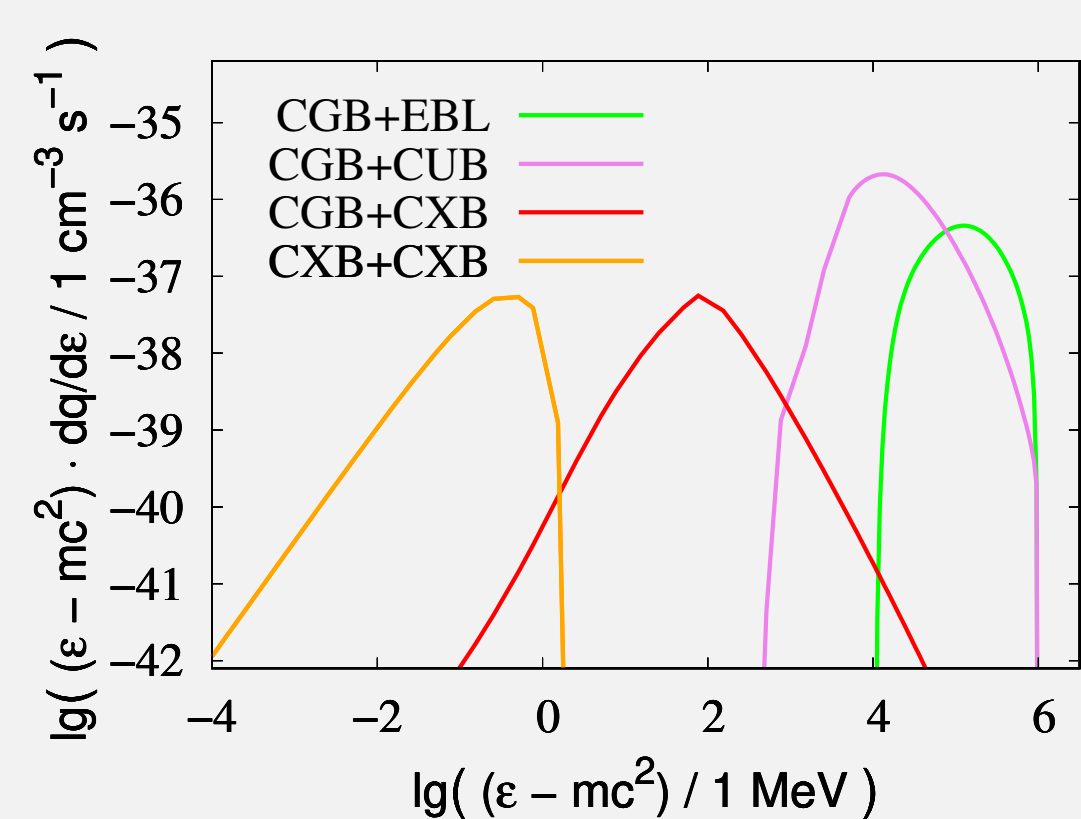


Рис. 3. Расчитанный спектр позитронов для  $z = 1.0$ .

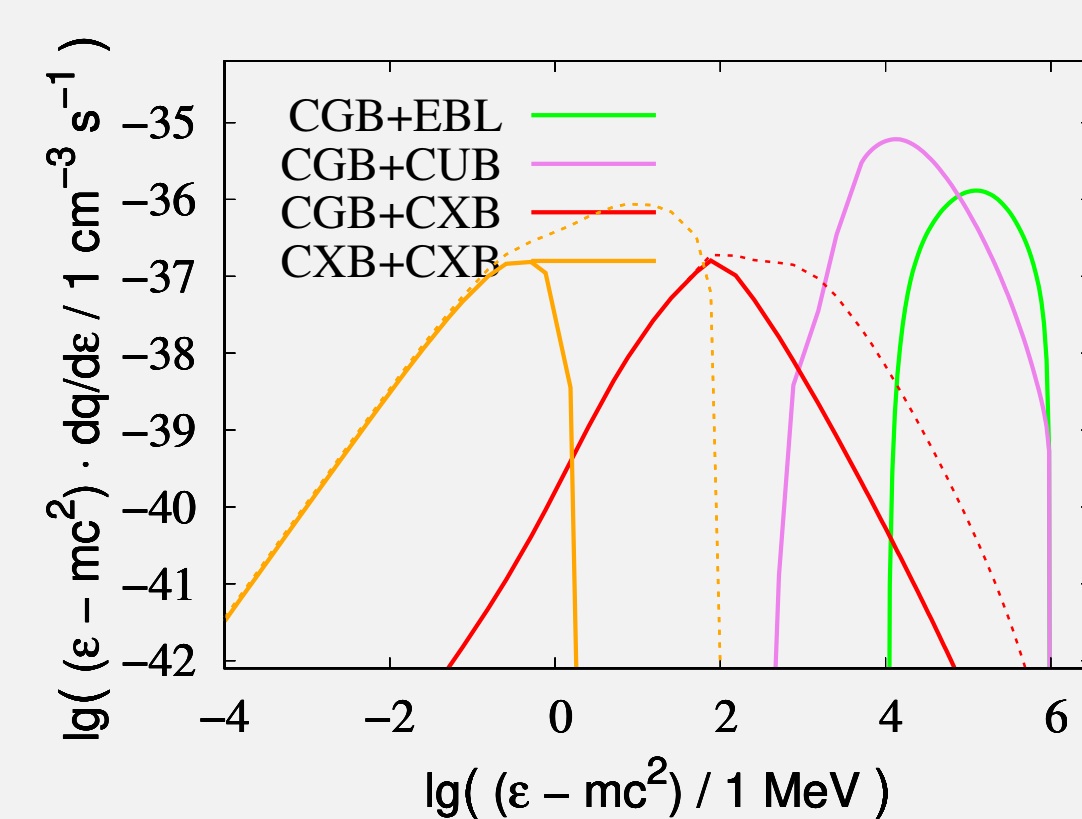


Рис. 4. Расчитанный спектр позитронов для  $z = 1.5$ .

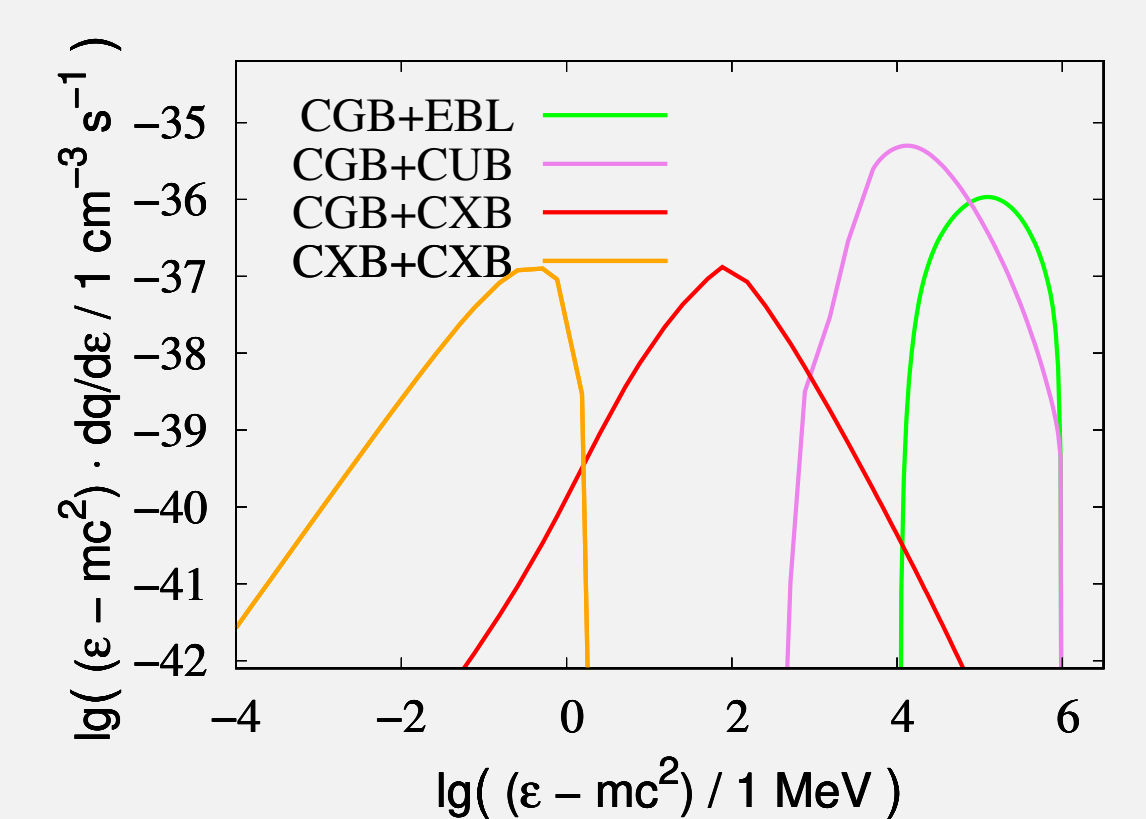


Рис. 5. Расчитанный спектр позитронов для  $z = 2.5$ .

## Выводы

На рис. 2-5 показан спектр рождающихся позитронов при взаимодействии СГВ-фотонов с СХВ, CUB и EBL-фотонами. Видно, что почти все позитроны рождаются с энергиями  $\varepsilon_+ \sim 10 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$ . Такие позитроны практически не аннигилируют [11] и постепенно накапливаются в межгалактическом пространстве. Но взаимодействие СХВ-фотонов друг с другом само по себе может порождать позитроны с малыми энергиями  $10 \div 100 \text{ кэВ}$ . Время жизни таких позитронов может быть оценено в  $(1 \div 3) \cdot 10^9$  лет, следовательно, они могут вносить вклад в аннигиляционную линию [10].

## Список литературы

- [1] R. Hill, K.W. Masui, D. Scott, Applied Spectroscopy, **72** (5), 663 (2018).
- [2] A. Cooray, Royal Society Open Science, **3** (3), 150555 (2016).
- [3] A. Franceschini, G. Rodighiero, M. Vaccari, A & A, **487** (3), 837 (2008).
- [4] M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert, W.B. Atwood, L. Baldini et al, ApJ, **799** (1), id. 86 (2015).
- [5] M. Ajello, J. Greiner, G. Sato, D.R. Willis, G. Kanbach et al, ApJ, **689** (2), 666 (2008).
- [6] R.J. Gould, G.P. Schreder, Phys. Rev., **155** (5), 1408 (1967)
- [7] Grebenev, S.A., Sunyaev, R.A., 2020, Astronomy Letters, v. 45, Issue 12, pp.791-820.
- [8] P.S. Behroozi, R.H. Wechsler, C. Conroy, ApJ, **770** (1), id. 57 (2013).
- [9] Popov, A.N., Barsukov, D.P., Ivanchik, A.V., et al. (2023), Technical Physics, v. 68, Issue 12, pp.1619-1621.
- [10] Nizamov, B.A., Pshirkov, M.S., 2023, Astronomy Letters, v. 49, Issue 1, pp.9-17
- [11] Nizamov, B.A., Pshirkov, M.S., 2024, eprint arXiv:2403.0842.